DOI: 10.19812/j.cnki.jfsq11-5956/ts.20251125005
引用格式: 黄子鹏, 何东平, 陈哲, 等. 油脂热加工过程中多环芳烃的形成规律与防控措施[J]. 食品安全质量检测学报, 2026, 17(10): 195–204.
HUANG ZP, HE DP, CHEN Z, *et al*. Formation rules and control measures of polycyclic aromatic hydrocarbons during the thermal processing of oils and fats [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2026, 17(10): 195–204. (in Chinese with English abstract).

油脂热加工过程中多环芳烃的形成规律与防控措施

黄子鹏[1], 何东平[1], 陈　哲[2], 殷娇娇[1*]

[1. 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全), 武汉轻工大学, 武汉　430023;
2. 武汉食品化妆品检验所, 武汉　430040]

摘　要: 油脂热加工过程中产生的苯并[a]芘、苯并[a]蒽、䓛和苯并[b]荧蒽(统称为 PAH4)是重要的致癌污染物。现有研究表明, PAH4 的生成主要遵循自由基介导的脂质热氧化路径, 其含量受脂肪酸组成、加热温度与时间等因素显著影响。有效的调控策略包括选用高油酸型油脂、添加适宜抗氧化剂、改进加热工艺以及采用吸附净化等末端治理技术。本文旨在系统阐明油脂热加工中脂肪酸组成与 PAH4 生成的内在关联, 构建从脂肪酸结构特性到污染物形成行为的理论框架。未来研究应致力于反应机制的原位解析、新型抑制剂的开发, 同时整合油脂组成与工艺参数, 构建面向实际生产的 PAH4 风险预警与工艺优化体系, 为保障油脂食品质量安全提供理论依据和技术支撑。

关键词: 油脂; 热加工; 多环芳烃; 形成机制; 脂质氧化; 调控策略

Formation rules and control measures of polycyclic aromatic hydrocarbons during the thermal processing of oils and fats

HUANG Zi-Peng[1], HE Dong-Ping[1], CHEN Zhe[2], YIN Jiao-Jiao[1*]

(1. *Key Laboratory of Edible Oil Quality and Safety*, *State Administration for Market Regulation*, *Wuhan Polytechnic University*, *Wuhan* 430023, *China*; 2. *Wuhan Institute for Food and Cosmetic Control*, *Wuhan* 430040, *China*)

ABSTRACT: Benzo[a]pyrene, benzo[a]anthracene, chrysene and benzo[b]fluoranthene (collectively known as PAH4), generated during the thermal processing of oils and fats, represent significant carcinogenic contaminants. Existing research indicates that PAH4 formation primarily follows a free radical-mediated lipid thermal oxidation pathway, with its content significantly influenced by factors such as fatty acid composition, heating temperature and duration. Effective control strategies include selecting high-oleic acid oils, adding suitable antioxidants, improving heating processes and implementing end-of-pipe treatment technologies like adsorption purification. This paper aimed to

收稿日期: 2025-11-25
基金项目: 国家市场监督管理总局重点实验室(食用油质量与安全)开放研究基金资助项目(SYYKF202405)
第一作者: 黄子鹏(2003—), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为食品科学与工程。E-mail: h3116002021@163.com
***通信作者:** 殷娇娇(1993—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为食品营养与安全。E-mail: yinjiaojiao@whpu.edu.cn

systematically elucidate the intrinsic relationship between fatty acid composition and PAH4 formation during the thermal processing of oils and fats, and established a theoretical framework linking the structural characteristics of fatty acids to the formation behavior of pollutants. Future research should focus on the *in-situ* analysis of reaction mechanisms and the development of novel inhibitors, while integrating oil composition and processing parameters to establish a PAH4 risk-warning and process optimization system tailored for industrial production. This will provide a theoretical foundation and technical support for ensuring the quality and safety of lipid-based foods.

KEY WORDS: oils and fats; thermal processing; polycyclic aromatic hydrocarbons; formation mechanism; lipid oxidation; regulation strategy

0 引 言

食用油脂是食品工业不可或缺的基础原料和传热介质, 广泛应用于煎、炸、烤等热加工工艺, 能够赋予食品独特的风味、色泽和质构特征。然而, 在高温加热过程中, 油脂会发生一系列复杂的化学变化, 包括不饱和脂肪酸的异构化、聚合物的形成等[1], 这些反应不仅导致油脂品质劣化、营养价值降低, 更会伴随产生多种有害污染物。其中, 多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)的生成对油脂品质的影响尤为重要, PAHs 是指分子中含有两个或两个以上苯环, 这些苯环以稠环形式连接的一类持久性有机污染物的总称, 广泛存在于环境中, 多与人类活动, 如化石燃料燃烧、工业生产、烟草燃烧等相关[2]。其中, PAH4 是 PAHs 中 4 种具有代表性的物质的统称, 这 4 种物质因毒性较强, 具有明确肝毒性[3], 在环境和产品中检出率较高, 常被作为重点监测对象。其中以苯并[a]芘(benzo[a]pyrene, BaP)、苯并[a]蒽(benzo[a]anthracene, BaA)、䓛(chrysene, CHR)和苯并[b]荧蒽(benzo[b]fluoranthene, BbF)为代表的 PAHs 类物质, 称为 PAH4, 因其具有强致癌性、急性毒性和遗传毒性[4], 受到全球范围的广泛关注, 其结构图如图 1 所示。

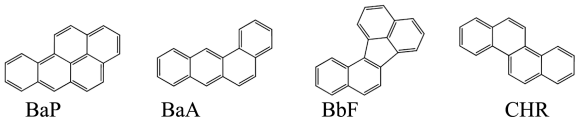


图 1 PAH4 结构图

Fig.1 Structures chart of PAH4

由于亲脂性的 PAH4 更容易与油结合[5], 促使携带油的 PAH4 通过脂质双分子层进入细胞, 产生更大的细胞毒性, 因此对其的监测尤为重要[6]。研究表明, PAH4 相较于 BaP 更适合作为评估食用油中 PAHs 污染程度的替代指标[7]。因此, 有效控制油脂热加工过程中 PAH4 的生成, 对保障食品安全和促进公众健康具有重要现实意义。

在食品加工过程中, 温度、时间、加工方式等外部因素以及食品基质本身的特性如 pH、组分构成、水分含量等均是影响 PAHs 生成的重要因素[8]。近年来的研究逐渐揭示, 油脂自身脂肪酸组成在食品油炸或烘焙等高温热加工过程的反应路径和产物形成中发挥着关键作用, 不同结构的脂肪酸对热氧化和热裂解的敏感性存在显著差异, 油脂脂肪酸组成很可能成为决定 PAH4 生成种类与水平的内在主导因素。不同的脂肪酸组成, 如饱和脂肪酸、单不饱和脂肪酸、多不饱和脂肪酸, 其碳链长度、双键数量和位置各异, 导致它们的热稳定性和氧化性存在显著差异。这些差异可能影响油脂在高温下生成的 PAH4 前体物(如醛、酮、自由基等)的种类与浓度, 进而影响 PAH4 的生成。研究表明, 多不饱和脂肪酸(如亚油酸、亚麻酸)的存在是导致高温下油脂氧化裂解并生成大量 PAH4 的关键因素, 这在葵花籽油和亚麻籽油等油脂中尤为显著, 这些油脂在加热时会形成大量 PAH4; 而高含量的单不饱和脂肪酸(如油酸)以及饱和脂肪酸使油脂有更高的热稳定性, 从而显著抑制了 PAH4 的生成, 这在花生油、芝麻油和椰子油中表现得尤为明显[9]。因此, 系统阐明脂肪酸组成与 PAH4 生成之间的内在关联, 能有效识别高温下易产生 PAH4 的油脂种类、可通过优化油脂类型或调控脂肪酸配比以实现污染物精准防控, 具有重要的理论价值与实践意义。

本文旨在系统阐明油脂热加工过程中脂肪酸组成与 PAH4 生成之间的内在关联, 构建从脂肪酸结构特性到污染物形成行为的理论框架。全文首先深入解析了 PAH4 的生成路径与反应机制; 梳理了不同饱和度脂肪酸在热反应中对 PAH4 生成的影响模式与潜在作用机制; 进一步地, 结合实际加工场景, 探讨温度、时间、抗氧化剂等外源因素的调节作用, 并基于脂肪酸调控视角提出 PAH4 的减控策略, 期望为食品热加工过程中油脂的精准选用与工艺优化提供理论依据。

1 PAH4 的形成机制

1.1 氢抽取-乙炔加成反应机制

氢抽取–乙炔加成(hydrogen extraction and acetylene addition, HACA)机制是由 FRENKLACH 等[10]于 1991 年研究碳烟在富燃火焰中的生成过程时提出, 是一种非常经典的反应机制, 目前已被广泛接受为一种典型的自由基链式

反应模型。该机制的基本过程为: 气相中的 H 原子或 • OH、• O • 等自由基从已有的芳烃分子(如苯、萘、菲)边缘的 sp^2C–H 键上抽走 H, 生成芳基自由基, 生成的芳基自由基与体系中大量存在的乙炔(C_2H_2)发生加成反应, 形成含三元环或五元环的过渡结构, 随后通过环化、异构化并再脱去一个 H, 完成“新苯环”的闭合, 得到比原来多一个六元环的 PAHs 分子, 如表 1, 小分子量 PAHs 可以继续生长为大分子 PAHs, HACA 机制也被视为 PAHs 产生的主要途径之一。

PAH4 中的 BaP 的形成过程如图 2 所示, 其本质是由小分子前体经不断加成最终形成多苯环的结构。研究表明食材中本来含有的一系列低分子量不饱和烃类可在氧化及芳构化作用下首先转化为初级芳香环; 随后, 这些芳香结构遵循 HACA 路径, 通过逐步缩合与聚合, 最终生成包括 PAH4 在内的高分子量 PAHs。需要提出的是, HACA 机制起始物通常为小分子量芳烃(如苯)与乙炔, 依赖于自由基引发反应自由基引发反应、高温(>1000 °C)、燃烧等条件, 因而在火焰或高温燃烧中占主导地位。

表 1　BaP 形成过程

Table 1　Formation process of BaP

阶段	反应式
环化	$C_2H_3+C_2H_2\rightarrow C_4H_4+H$
苯形成	$C_4H_3+C_2H_2\rightarrow C_6H_6+H$
萘形成	$C_8H_7+C_2H_2\rightarrow C_{10}H_8+H$
芘形成	$C_{16}H_9+C_2H_2\rightarrow C_{16}H_{10}+H$
BaP	$C_{20}H_{11}+C_2H_2\rightarrow C_{20}H_{12}+H$

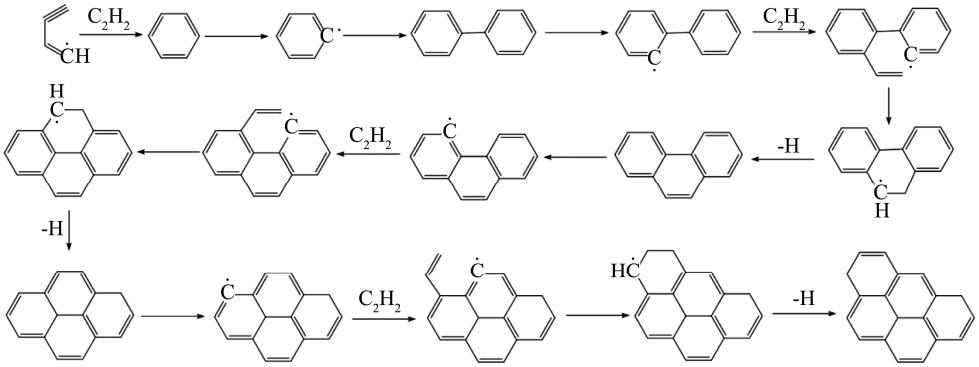


图 2　HACA 途径产生 BaP 的机制[4,10]

Fig.2　Mechanism of BaP formation via the HACA pathway[4,10]

1.2　狄尔斯-阿尔德反应机制

SIEGMANN 等[11]于 2000 年在研究甲烷燃烧提出通过狄尔斯-阿尔德(Diels-Alder)机制 PAHs 产生途径。Diels-Alder 途径是一种协同的环加成反应, 其过程不依赖自由基或氧气参与: 共轭二烯与烯烃或炔烃在无需自由基、无需氧气的条件下直接形成六元环, 随后通过脱氢即可得到新的芳香环。如图 3 所示, 起始物为共轭二烯(如 1,3-丁二烯)与烯烃或炔烃(如乙烯、乙炔), 通过共轭二烯与亲双烯体之间的加成形成闭环加成反应, 形成六元环结构。后续通过脱氢反应形成芳香环, 生成如苯、萘、BaA 等 4、5 环 PAHs, 由于反应无需自由基参与且在较低温度下(200~400 ℃)即可进行, Diels-Alder 途径在脂质热解体系中具有重要贡献, 如亚油酸裂解产生的共轭二烯。

与 HACA 机制类似, Diels-Alder 路径同样可通过重复反应实现 PAH4 的逐步增长: 双烯体与炔烃不断参与环加成, 使六元环数量增加, 随后经氧化过程形成多种 PAH4。二者的主要区别在于反应条件: Diels-Alder 机制在较低温度下无需自由基即可成环, 而 HACA 路径则依赖高温(>1000 °C)及自由基环境。

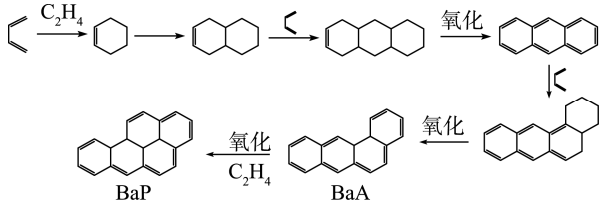


图 3　Diels-Alder 途径产生 BaP 的机制[4]

Fig.3　Mechanism of BaP formation via the Diels-Alder pathway[4]

1.3　苯基加成-环化机制

SHUKLA 等[12]研究发现苯基加成-环化(phenyl addition/cyclization, PAC)机制可高效生成 PAHs, 其与 HACA 机制有差异, 为理解燃烧、热解过程中 PAHs 的快速生成提供了关键理论依据。其发现苯基自由基生成苯通过直接分解或与氢原子反应, 生成苯基自由基, 苯基自由基再攻击 PAHs 的芳香环, 形成苯基取代 PAHs, 最后脱氢环化, 苯基在高温下取代 PAHs 发生环化反应, 形成更稳定的稠环 PAHs, 并产生 2 个新的活性位点, 实现 PAHs 的生长(图 4)。该机制启发研究者关注 PAC 与 HACA 的协同机制, 为更复杂燃烧体系(如发动机燃烧、生物质热解)的

PAHs 控制提供理论依据。有研究指出，实际热系统中 PAH4 的生成是多机制协同作用(如 HACA 和 PAC)，但现有动力学模型多单独考虑单一机制，导致 PAH4 预测值与实验值偏差达 25%~30%[13]。

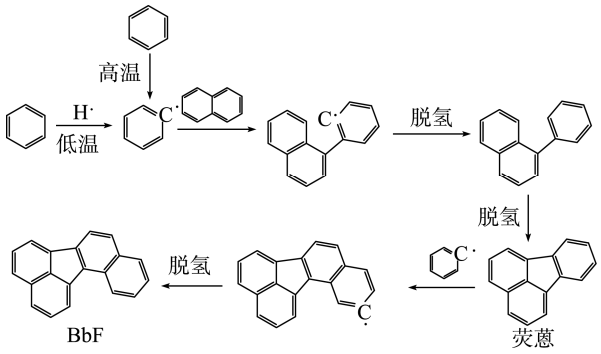


图 4 PAC 途径产生 BbF 的机制[12]

Fig.4 Mechanism of BbF formation via the PAC pathway[12]

1.4 其他机制

2023 年，XU 等[14]研究脂肪酸类型对 PAH4 生成含量的影响时，以亚油酸(C18:2)为多不饱和脂肪酸的代表，因其反应活性高、PAH4 生成量显著而作为模型物质，在 160~200 ℃、有氧低温条件下阐明了脂质驱动 PAH4 生成的独特扩环机制。如图 5 所示，亚油酸水解氧化形成脂质氢过氧化物 ROOH，ROOH 均裂产生共轭烯烃自由基，该自由基经分子内环化与脱氢得到初始苯环，再与另一分子共轭烯烃通过 Diels-Alder 反应或自由基重组完成低温扩环。该路径在 160~200 ℃下即可反应，解释了实际油脂热加工中 PAH4 生成的现象。由于亚油酸(18:2)、油酸(18:1)等同样可生成共轭烯烃/自由基中间体，实验证明它们的 PAH4 产率随不饱和度增加而显著升高。其关键中间体(共轭烯烃、环己烯自由基)在其他不饱和脂肪酸中同样存在，故可视为不饱和脂肪酸在热氧化条件下生成 PAH4 的共性路径，而非亚油酸所特有，可推广至多数不饱和脂肪酸。XU 等[15]的相关研究延伸的为这一观点也提供了支持，其发现油脂热解会产生不饱和烯烃、炔烃，这些物质可通过环化、聚合反应逐步形成单环芳烃，进而生成 PAH4。其机制与依赖高温(>1000 ℃)及自由基链反应的 HACA 机制不同，也有别于理想协同的经典 Diels-Alder 路径，该机制揭示了脂质自身结构在热氧化条件下驱动的独特低温扩环路径，为食品工业中通过调控脂质组成或抑制氧化路径来降低 PAH4 风险提供了理论依据。

2 PAH4 产生的影响因素

2.1 油脂种类与品质

2.1.1 油脂脂肪酸组成

油脂脂肪酸组成是影响热加工过程中 PAH4 生成的关键内在因素，油脂的选择对 PAH4 产生的影响有着重大的影响。大量研究表明油脂不饱和度与 PAH4 生成呈正相关[14]，

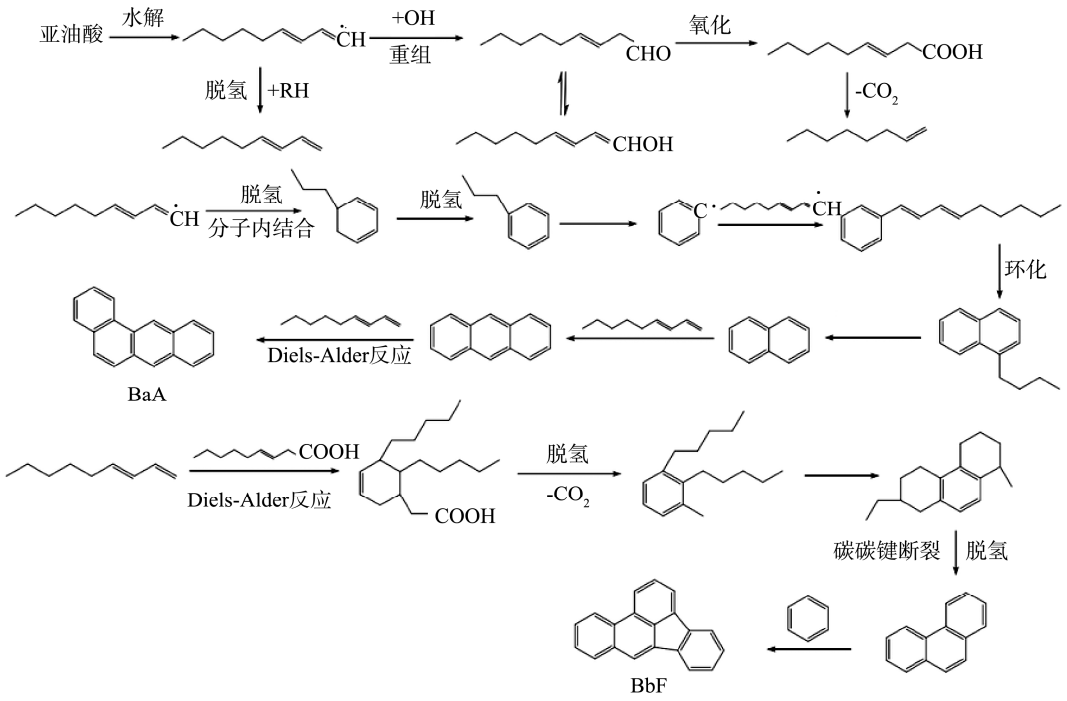


图 5 亚油酸形成 PAHs 途径[14]

Fig.5 Pathways of PAHs formation from linoleic acid[14]

这与不饱和脂肪酸的热反应机制密切相关: 饱和脂肪酸因无双键呈直链结构, 分子排列紧密, 因此熔点高、热稳定性好, 单不饱和脂肪酸含一个双键, 热稳定性优于多不饱和脂肪酸, 但弱于饱和脂肪酸, 这是因为双键是高温下最易被攻击的位点, 可引发自由基链式反应, 而多不饱和脂肪酸的多个双键会使其更易发生裂解、环化和芳构化[15]。多不饱和脂肪酸因含多个双键, 分子结构高度弯曲, 极易发生氧化、聚合及裂解反应, 且双键位置会进一步影响其氧化速率; 反式脂肪酸则因双键为反式构型, 分子结构更接近直链, 熔点相对较高, 热稳定性较强。特别是, 多不饱和脂肪酸中的亚油酸和亚麻酸在高温下容易发生聚合反应, 形成含苯环的单体, 这些单体正是 PAH4 的重要前体[9]而碳链长度也会影响油脂结构特性。从结构分类上看, 脂肪酸可依据碳链长度划分为短链(C4~C6)、中链(C8~C12)与长链(≥C14)脂肪酸[16–17]; 根据不饱和度可以分为饱和脂肪酸与不饱和脂肪酸, 脂肪酸还可依据双键位置与构型进一步细分, 如按双键始于碳链甲基端的位置可分为 *n*-3 系列(如 *α*-亚麻酸, 双键始于第 3 位)和 *n*-6 系列(如亚油酸, 双键始于第 6 位), 不饱和脂肪酸又可以分单不饱和脂肪酸和多不饱和脂肪酸, 常见的油脂脂肪酸组成如表 2 所示。

表 2　常见油脂脂肪酸组成[17–20]

Table 2　Fatty acid composition of common fats and oils[17–20]

品种	饱和脂肪酸/%	不饱和脂肪酸/%
核桃仁油	8.40	91.60
豆油	18.07	91.83
花生油	22.56	77.44
玉米油	14.25	85.75
芝麻油	15.56	84.44
菜籽油	9.47	90.53
棕榈油	51.10	48.90
猪油	37.42	62.58
牛油	65.88	34.12
羊油	67.12	32.82
甲鱼油	49.56	50.44
鱼油	32.60	67.40

由表 2 可以看出, 植物油脂如核桃仁油、豆油、菜籽油中不饱和脂肪酸占比普遍高于 90%, 而动物油脂如猪油、牛油、羊油中则以饱和脂肪酸为主, 占比超过 60%。值得注意的是, 棕榈油作为植物油脂的例外, 其饱和脂肪酸含量高达 51.10%, 而鱼油和甲鱼油作为动物油脂, 其不饱和脂肪酸比例较高, 显示出油脂的脂肪酸组成并非仅由动植物来源决定, 而与其具体种类密切相关。

通过表 3 可以看出, 在相同温度和加热时间下, 脂肪酸生成 PAH4 的含量随不饱和度的提高而增加, 特别是 BaA 和 CHR 受不饱和度的影响较大, 这一规律也有大量实验证明, 聂文[23]通过模型体系研究发现, 烤肠中 PAHs 的含量随所添加脂肪酸不饱和双键数量的增加而显著增加, 且该效应与脂肪酸碳链长度无关。这在实际油脂体系中也得到广泛验证: 董君[24]指出, 使用不饱和脂肪酸含量高的煎炸油, 其样品中生成的 PAH4 含量也越高; 反之, 不饱和脂肪酸含量低的油品则表现出更低的 PAH4 生成潜力。陈焱等[25]进一步明确, 葵花籽油、玉米油等因富含高比例的亚油酸(≥56%), 在加热过程中更易生成 PAHs 的关键中间体。与此形成对比的是, 王澍等[21]的研究表明, 富含饱和脂肪酸的棕榈油因其卓越的煎炸稳定性, PAH4 的累积趋势相对缓和。胡洋健[26]的对比实验也佐证了这一点, 葵花籽油与黄油在烤制时的 PAH4 生成量显著低于菜籽油与猪油。

具体的油脂加热实验可更直观验证这一规律, 如表 2、3 中所示, 棕榈油的饱和脂肪酸占比较高, 其耐高温、稳定性好, 温度从 140 ℃升至 180 ℃, 加热 36 h 后, BaP 的含量从 1.13 μg/kg 增至 1.60 μg/kg, CHR 的含量从 0.58 μg/kg 增至 0.71 μg/kg, 且 BaA 和 BbF 在所有条件下均未检出, 说明棕榈油中 PAH4 污染较轻。这表明棕榈油在高温长时间加热下 PAH4 生成量仍较低, 适合高温煎炸, 但需控制加热时间, 避免超过 36 h。

大豆油作为日常生活中较为常见的油脂, 其 PAH4 生成情况也进一步印证了上述规律, 大豆油主要由不饱和脂肪酸组成, 在 190 ℃±5 ℃加热过程中, PAH4 含量从原油的 6.88 μg/kg 升至 32 h 后的 10.35 μg/kg[27], 这与前文董君[24]提出的不饱和脂肪酸含量高的煎炸油 PAH4 生成量更高的结论完全契合, 同类研究结果表明, 同等加热条件下大豆油 PAH4 的变化幅度比花生油大[28], 再次凸显了油脂选择对 PAH4 生成的重大影响。富含不饱和脂肪酸的榛子油则呈现出另一特点。榛子油因不饱和脂肪酸含量高, 氧化稳定性较差, 研究表明其从原油状态经 210 ℃加热 10 min 后, BaP 含量从 0.39 μg/kg 增至 0.61 μg/kg, CHR 含量从 1.00 μg/kg 增至 1.22 μg/kg。尽管所有 PAH4 组分均随温度升高与时间延长而呈上升趋势, 但总体增长幅度相对温和。

此外, 油脂的初始氧化状态也不容忽视。刘梓萱[22]研究明确指出, 新鲜度越高的油脂, 其 PAH4 生成量越少, 因此在实际加工中应严格避免使用已发生氧化的油脂, 以从源头控制风险。并且要避免使用共混油, XIN 等[29]研究发现共混提高了棕榈油和高油类油中 PAH4 的生成速率, 纯棕榈油 PAH4 均值 1.92 μg/kg, 棕榈油占比小于 50%的调和油 PAH4 均值 5.88 μg/kg, 调和油 PAH4 含量随非棕榈油添加比例升高而增加, 证实纯棕榈油比棕榈调和油更安全。其发现高油酸调和油 PAH4 均值 5.21 μg/kg, 纯高油酸菜籽油 PAH4 均值 3.64 μg/kg, 纯高油酸葵花籽油 PAH4 均值 3.87 μg/kg, 高油酸调和油 PAH4 含量及变化幅度均高于对应纯油, 进一步证实纯油更安全。

表 3 不同油脂加工产生 PAH4 含量(ng/g)
Table 3 PAH4 content generated by processing different oils (ng/g)

油脂种类	反应物	反应条件	BaP	BaA	BbF	CHR	PAH4 总量	参考文献
脂肪酸(C18:0)	-	200 ℃/2 h	0.52	2.13	1.36	1.36	5.35	
脂肪酸(C18:1)	-	200 ℃/2 h	1.01	2.30	1.13	1.69	6.13	
脂肪酸(C18:2)	-	200 ℃/2 h	0.95	2.61	1.13	2.08	6.77	
甘油三酯(C18:2)	-	200 ℃/2 h	0.02	2.73	0.76	0.96	4.47	[14]
甘油二酯(C18:2)	-	200 ℃/2 h	0.83	2.13	0.87	1.23	5.06	
甘油单酯(C18:2)	-	200 ℃/2 h	0.98	2.30	0.86	1.14	5.28	
棕榈油	面制品	140 ℃/36 h	1.13	-	-	0.58	1.71	
		150 ℃/36 h	1.21	-	-	0.61	1.82	
		160 ℃/36 h	1.23	-	-	0.78	2.01	[21]
		170 ℃/36 h	1.33	-	-	0.89	2.22	
		180 ℃/36 h	1.60	-	-	0.71	2.31	
榛子油	-	未加热原油	0.39	0.10	1.08	1.00	2.57	
	-	150 ℃/5 min	0.42	0.12	1.10	1.05	2.69	
	-	180 ℃/5 min	0.48	0.15	1.14	1.12	2.89	
	-	210 ℃/5 min	0.55	0.18	1.20	1.18	3.11	[22]
	-	150 ℃/10 min	0.45	0.14	1.13	1.10	2.82	
	-	180 ℃/10 min	0.52	0.17	1.17	1.15	3.01	
	-	210 ℃/10 min	0.61	0.21	1.25	1.22	3.29	

注: -表示文献未有此项。下同。

食材本身的脂肪含量也会影响 PAH4 生成, 食材自身的脂肪含量是影 PAH4 生成的关键内在因素, 其通过驱动脂肪热解反应、提供 PAH4 前体物质, 直接决定 PAH4 的生成量, 且这一规律在不同食材类型、加工场景中均得到验证: 如油籽烘烤过程中产生的多环芳烃可能主要与油脂含量有关, 油籽中油脂含量越高, 种子烘烤预处理过程中越容易产生 PAH4[30]。EL-HUSSEINI 等[31]在炭火烤肉中的研究清晰印证了脂肪含量与 PAH4 生成的正相关关系, 其发现 PAH4 含量呈现明显的部位差异, 排序为: 鸡翅(15.67 μg/kg)> 鸡腿 (13.62~24.30 μg/kg)> 鸡肉块串 (9.89~9.90 μg/kg)>鸡胸(9.48~9.70 μg/kg)>牛肉块串(7.60~9.13 μg/kg)> 烤串(7.35~8.46 μg/kg), 这个现象的核心原因是鸡翅、鸡腿的脂肪含量显著高于鸡胸、牛肉块串, 脂肪热解是 PAH4 的主要来源, 脂肪滴落至炭火产生烟雾, PAH4 随烟雾会附着于肉表面, 在且相同烹饪温度、脂肪含量、炭火类型的条件下, 肉块大小(表面积/质量比)与 PAH4 含量呈正相关。LIU 等[32]的研究进一步证明了这一点, 其研究发现鸡翅这种高油高蛋白食材油炸后 PAH4 浓度(1.62 μg/kg)显著高于土豆(1.32 μg/kg), 因脂肪、蛋白质和碳水化合物等营养物质在 200 ℃及以上的高温条件下裂解, 产生低分子量的轻环和具有高反应活性的中间自由基[33], 进一步提升 PAH4 的生成效率。

2.1.2 内源性抗氧化物质

除脂肪酸组成外, 油脂中的天然抗氧化组分对 PAH4 生成的影响则呈现出更为复杂的“双刃剑”效应。裴雯君[34]的研究揭示了一个值得深入探讨的现象, 如表 4 所示, 初榨油茶籽油含有更为丰富的多酚与生育酚, 但在 180 ℃加热 6 h 后, 其 PAH4 的增长率(82.61%)却显著高于精炼油(36.01%)。这表明, 在某些热加工场景下, 精炼过程通过去除部分脂质伴随物, 反而可能在一定程度上降低了 PAH4 的生成风险。这一发现与文献[7]的观点一致, 即充分精炼的大豆油、玉米油通常具有较低的 PAHs 本底含量。

即便是常被认为具有良好健康特性的高油酸型山茶油, 在特定热加工条件下也呈现出特殊的 PAH4 变化规律。高油酸型山茶油因含 α-生育酚等天然抗氧化物, 本应具备较好的稳定性, 但在 180 ℃加热 15 min 时, BaP 含量已达 2.84 μg/kg, CHR 含量更是高达 14.93 μg/kg; 而随着加热时间延长, 所有 PAH4 组分的含量均呈现下降趋势。这一现象可能与 PAHs 化合物在持续加热过程中的挥发、热降解, 或与油脂基质中活性成分的相互作用有关, 也进一步印证了天然抗氧化组分对 PAH4 影响的复杂性。

表 4　不同油脂加工产生 PAH4 含量(ng/g)
Table 4　PAH4 content generated by processing different oils (ng/g)

油脂种类	反应物	反应条件	BaP	BaA	BbF	CHR	PAH4 总量	参考文献
山茶油+0.01% α-生育酚		180 ℃/15 min	1.20	2.80	1.90	8.20	14.10	
山茶油+0.02% α-生育酚		180 ℃/15 min	2.84	4.98	3.92	14.93	26.67	[35]
山茶油+0.04% α-生育酚		180 ℃/15 min	2.87	4.90	3.85	14.50	26.12	
山茶油+0.08% α-生育酚		180 ℃/15 min	2.90	4.95	3.88	14.60	26.33	
羊脂肪	-	240 ℃, 电烤 30 min	34.06	-	14.46	34.67		
鸭脂肪	-	240 ℃, 电烤 30 min	34.02	-	16.00	34.69		[36]
猪脂肪	-	240 ℃, 电烤 30 min	34.05	-	16.21	34.61		
精炼油茶籽油	-	180 ℃/6 h	2.5	3.1	2.0	8.8	16.4	
初榨油茶籽油	-	180 ℃/6 h	3.5	4.2	2.9	14.1	24.7	[34]
精炼油茶籽油茶儿素	-	160 ℃/20 min	2.84	4.22	3.92	14.93	25.91	
精炼油茶籽油+α-生育酚	-	180 ℃/15 min	2.87	4.22	2.94	14.12	24.15	

2.2　加工过程

加工过程中温度、时间、加热方式均会显著影响 PAH4 的生成, 其中温度和时间是调控 PAH4 形成的核心因素。PAH4 的生成依赖脂质热解、自由基重组及环化反应, 而这些过程的启动与速率均与温度、时间密切相关。研究表明, 大多数多环芳烃(含 PAH4)的浓度随油炸时间延长而增加, 尤其是 4~5 环的致癌性 PAH4, 在较高温度下会因热氧化、β-剪切、Diels-Alder 反应及 HACA 机制的启动, 生成大量 PAH4[29,37]。根据 PAH4 生成的途径也能推测加工的时间越长, 产生的小分子自由基也会越来越多, 虽然在低温条件下可能未达到脂质裂解与环化反应能垒, 随着温度升高, 热氧化、β-剪切、Diels-Alder 反应以及 HACA 机制启动, 使 PAH4 含量显著增多。

不同研究进一步明确了温度与时间的调控阈, MEHDI 等[38]的实验以维也纳香肠为研究对象, 采用煎制的热加工方式, 发现 206 ℃ 3 min 组的加工时间(3 min)比 171 ℃组(5 min)缩短了 40%, 但 BaA、BaP 的含量仍显著更高, 这一结果证明: 在煎制过程中, 温度是调控 BaA、BaP 形成的主导因素。刘聪聪[36]的研究则指明 30 min 电烤已导致 PAH4 显著生成, 而缩短加热时间可减少 PAH4 产生风险。裴雯君[34]的实验更精准量化, 其发现 PAH4 在 160~200 ℃时生成量显著增加, 在 160 ℃加热 20 min、180 ℃加热 15 min 达到峰值。需注意的是“低温长时”与“高温短时”的安全性需结合具体场景判断, 陈焱等[25]在 170 ℃下连续煎炸 40 h, 发现 6 种油的 PAHs 和 BaP 均随时间延长持续降低。但也有研究发现随着温度和加工时间的升高, PAH4 的迁移率也随之升高[39], 要从多个角度考虑高温加工食品中多环芳烃造成的食品安全问题。

加热方式通过改变油脂和热源接触状态如是否接触明火、油层厚度等, 影响 PAH4 的生成路径, 能直接影响 PAH4 的形成效率。白雪[40]的研究发现, 电烤方式优于炭烤, 因为电烤温度更均匀, 且能避免油脂直接接触明火, 仅这一点就能使牛肉中 PAH4 含量比炭烤降低 50%以上。YANG 等[41]对比了煎炒与深炸的山羊肉, 测得 PAHs 分别为 20.28 μg/kg 与 13.7 μg/kg, 可能是由于煎炒油层薄, 油-空气界面大, 氧化剧烈, 促进 PAH4 前体自由基生成。

3　防控措施

3.1　油脂选择

基于油脂种类对 PAH4 生成的影响规律, 油脂选择应优先规避高风险品类, 针对性挑选适配加工场景的油脂。从脂肪酸组成来看, 应优先选择饱和脂肪酸含量高、不饱和脂肪酸含量低的油脂, 这类油脂热稳定性强, 可以减少 PAH4 的生成量, 如棕榈油[21], 其在高温长时间加热下 PAH4 生成量仍较低, 适合高温煎炸场景。

严格筛选油脂新鲜度, 优先选用新鲜未氧化的油脂, 避免使用已发生氧化变质的油脂, 从源头减少 PAH4 生成基础。同时应尽量选择纯油而非调和油, 因调和油 PAH4 含量及增长幅度均高于对应纯油, 纯棕榈油、纯高油酸菜籽油等纯油品类的食用安全性更优[29]。

油脂选择需匹配烹饪方式, 不饱和脂肪酸含量高的油脂如榛子油、大豆油, 热稳定性较差, PAH4 生成风险随温度升高和时间延长而上升, 应避免长时间高温加热, 榛子油更适合中低温烹饪或凉拌, 大豆油需严格控制高温加工时长; 高油酸型山茶油等含特殊天然抗氧化物的油脂, PAH4 变化规律复杂, 需根据具体加工条件合理选用, 避免在其 PAH4 生成峰值条件(如 180 ℃加热 15 min)下使用。

3.2　加工过程控制

加工程控制需围绕温度、时间、加热方式等核心影响因素, 结合食材特性与工艺环节实施管控。温度与时间管控方面, 应根据油脂类型和食材特性设定合理参数, 优先

将加热温度控制在 160 ℃以下，缩短加热时长以防止 PAH4 生成峰值；需平衡“控温”与“限时”协同效应，特定相对低温场景(如 170 ℃)下可采用长时加工，但需避免温度超过 170 ℃，优先使用恒温控制设备减少温度波动。

加热方式选择上，优先采用电烤等非明火加热方式，避免炭烤等油脂直接接触明火的加工方式，降低 PAH4 生成效率；根据食材特性选择合适的加热方式，如高油食材尽量避免煎炒，可采用深炸减少氧化剧烈程度。加热过程中 PAH4 的迁移风险也需同步管控：研究显示小粒径颗粒物是 PAH4 的主要载体，控制该粒径颗粒物排放可有效降低 PAH4 暴露风险[42]。并且 PAH4 向油烟中迁移在 160~200 ℃下迁移率可达 2.23%~18.18%，因此安装高效油烟净化设备可有效减少环境中的 PAH4 二次污染[36]。

食材管理方面，优先选择脂肪含量低的食材部位，减少 PAH4 前体物质来源[31]；食材加工前需保留外壳(如坚果、可可豆外壳)直至加工前一刻，利用外壳阻隔环境中 PAH4 的污染，食材外壳对 PAH4 也具有天然阻隔作用：ÖZ 等[43]在所有生坚果及不同烘烤程度的坚果样品中，均未检测到 PAH4，生坚果的外壳可阻隔环境中 PAH4 的污染。AGUS 等[44]也证实了这一规律，其发现干燥可可豆壳中 PAH4 达 6.08 ng/g，豆仁仅 0.26 ng/g；整豆烘焙时，豆壳中的 PAH4 迁移至豆仁，导致 110 ℃即可检出 PAH4；豆仁烘焙因无豆壳保护，150 ℃后 PAH4 才显著增加。

在油脂储藏阶段，定期检查设备防止漏油，并通过过滤、静置去除杂质等措施，也能减少 PAH4 的产生[45]。在油脂精炼阶段，不同工艺对 PAH4 的去除效果差异显著，JI 等[46]研究发现脱色是降低毒性更强的重质 PAHs 的最有效方法之一，而脱臭则是降低低分子量 PAHs 的有效手段，RATERS 等[47]的研究更好能证明这一点，其发现可可脂脱臭工艺通过高温与高真空可去除挥发性 PAH4，故污染更低。

3.3 添加外源抗氧化剂

添加外源抗氧化剂也是减少油脂加工中 PAH4 生成的重要方法，从源头上减少 PAH4 形成所需的前体物质，PAH4 迁移与自由基浓度呈极强正相关，选择高自由基清除能力的抗氧化剂是控制 PAH4 的关键策略[42]。然而，抗氧化剂的应用效果呈现显著的“种类与剂量依赖性”，并非所有情况均能有效抑制 PAH4 生成，甚至在特定条件下可能产生反效果。如裴雯君[34]研究发现，当茶素添加量 0.005%~0.01%或 α-生育酚添加量 0.02%~0.08%时，反而通过促进自由基生成和脂质氧化，显著增加 PAH4 含量，这一现象可能与低剂量抗氧化剂在高温下被优先氧化，转化为具有促氧化活性的中间产物有关，提示抗氧化剂的剂量控制需严格匹配加工场景与油脂特性。

相较之下，多种天然抗氧化剂在适宜浓度下展现出良好的抑制效果。刘聪聪[36]研究表明在 2 mg/g 添加量时，表没食子儿茶素没食子酸酯和竹叶黄酮对亚麻酸甲酯热裂解生成 PAH4 的抑制率分别达 23.31%和 17.86%，其中竹叶黄酮对轻环 PAHs 表现出更强的抑制效果。在食品基质中，抗氧化剂的抑制作用同样得到验证：TIAN 等[48]研究表明姜黄素的应用能有效降低烤鸡翅中 PAHs 的生成，且与 PAHs 呈现浓度效应关系，姜黄素含量越高，PAHs 被抑制效果越明显，可能与姜黄素的酚羟基结构清除烤制过程中产生的自由基有关。类似地，绿原酸在 0.2 mmol/L 浓度下腌制羊肉后烤制可同时降低 PAH4 和 BaP 含量，整体 PAHs 降幅达 28.4%；而 1 mmol/L 浓度的儿茶素腌制也能显著减少 PAH4 的累积[40]。迷迭香提取物在 0.25%~0.75%的最佳剂量时，对 PAH4 的抑制率达 30%~45%[49]。

除天然抗氧化剂外，合成抗氧化剂在特定条件下也表现出优异的 PAH4 抑制效果。研究显示，在 200 ℃的油脂加热体系中，添加 500 mg/kg 叔丁基对苯二酚的实验组，其 PAH4 含量为 6.66 μg/kg，较未添加叔丁基对苯二酚的对照组(9.40 μg/kg)降低 29.1%，且随叔丁基对苯二酚浓度的进一步升高，抑制效果呈持续增强趋势[50]。

3.4 其他处理

其他处理措施主要通过物理吸附与污染阻隔等方式，作为加工后管控的重要补充，进一步降低最终产品 PAH4 含量。胡洋健[26]提出的烤制前处理方法，对 PAH4 的抑制率可达 35%~96%。此外还需避免己醛、2-辛烯醛等挥发醛的积累，因为这些小分子醛会与萘聚合生成 PAH4，可通过通风、密闭加热减少醛类滞留，或添加二丁基羟基甲苯(2,6-二叔丁基对甲酚)、抗坏血酸等自由基清除剂阻断聚合反应[22]。SISKOS 等[51]研究也很好证明了这类预处理方法的作用，他们对鱼片进行预先干燥处理，不仅能使最终烟熏产品获得更优的感官风味，还可显著降低其 PAHs 的含量。

多孔材料与生物大分子可通过物理吸附作用，也可去除油脂或食品中的 PAH4。壳聚糖被证实不仅能吸附 PAH4，还能降低其毒性效应，从而对油脂及食品体系提供双重保护[52]。张东东[53]的研究也很好验证了这一点，其利用多孔结构材料吸附油脂中的 PAHs 及其中间产物，其中活性白土对 BaP 等 PAHs 的吸附率超过 80%。同样，DOYEONG 等[54]也发现纤维素气凝胶作为一种新型吸附剂，可以有效降低芝麻油中 PAH4 的含量水平。

4 结束语

食品在热加工过程中油脂氧化裂解生成 PAH4 的过程是一个涉及物理、化学与食品科学的复杂问题，其形成主要遵循热解与热氧化两条路径，其中以自由基链式反应为核心的热氧化路径在大多数食品加工场景中占据主导。本研究系统梳理了影响此过程的关键因素：在内在因素方面，油脂的脂肪酸组成(尤其是不饱和度)是决定其生成潜力的本征属性，而生育酚、多酚等微量组分则展现出促进或抑

制的复杂“双刃剑”效应; 在外部参数方面, 加热温度与时间是最关键的调控杠杆, 二者共同决定了反应动力学进程。基于此, 本文进一步综述了从源头控制(选用高稳定性油脂、添加适宜抗氧化剂)、过程优化(改进加热方式)到末端治理(油烟净化、吸附精炼)的综合调控策略, 为有效减控 PAH4、保障食用油与煎炸食品的食用安全提供了系统的理论依据与实践指南。当前关于脂肪酸与 PAH4 关系的研究仍存在分子机制不明确、定量关联缺失等问题, 未来可从以下方向深化: 聚焦分子机制的精准分析, 需进一步探究特定脂肪酸如亚油酸、油酸对 PAH4 生成路径的作用机制, 明确其结构特征与 PAH4 生成量之间的关系, 建立脂肪酸结构与 PAH4 生成量的模型; 在防控策略方面, 可基于不同油脂的脂肪酸特性(如高 PUFA 的葵花籽油、高饱和脂肪酸的棕榈油), 优化抗氧化剂复配方案, 以提升抑制效率并降低单一成分过量带来的风险; 同时结合多孔材料吸附、冷等离子体预处理等技术, 实现 PAH4 的精准抑制; 还可在现有加工参数研究基础上, 进一步整合脂肪酸组成、加热温度与时间等关键因素, 形成面向实际生产的 PAH4 风险预警与工艺优化建议, 为食品企业在油种选择与热加工条件设定上提供更具针对性的指导。

参考文献

[1] 张骊, 赵宇, 贺婵英. 油脂在高温下的副反应及其控制[J]. 中国油脂, 2002(3): 22–24.
ZHANG L, ZHAO Y, HE CY. Side reactions of oils at high temperature and their control [J]. Chinese Oils and Fats, 2002(3): 22–24.

[2] SAHOO BM, RAVI-KUMAR BVV, BANIK BK, *et al*. Polyaromatic hydrocarbons (PAHs): Structures, synthesis and their biological profile [J]. Current Organic Synthesis, 2020, 17(8): 625–640.

[3] YANG M, LU Y, MAO W, *et al*. New insight into PAH4 induced hepatotoxicity and the dose-response assessment in rats model [J]. Chemosphere, 2024, 350: 141042.

[4] 颜婷, 葛天嗣, 黄才欢, 等. 多环芳烃的形成、危害及其减控技术研究进展[J]. 食品科学, 2024, 45(14): 257–266.
YAN T, GE TS, HUANG CH, *et al*. Formation, hazards and control technologies of polycyclic aromatic hydrocarbons: A review [J]. Food Science, 2024, 45(14): 257–266.

[5] ZHANG YJ, CHEN XQ, ZHANG Y. Analytical chemistry, formation, mitigation, and risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons: From food processing to *in vivo* metabolic transformation [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2021, 20(2): 1422–1456.

[6] LIU G, ZHOU W, ZHANG X, *et al*. Toxicity and oxidative stress of HepG2 and HL-7702 cells induced by PAH4 using oil as a carrier [J]. Food Research International, 2024, 178: 113988.

[7] SHI LK, ZHANG DD, LIU YL. Incidence and survey of polycyclic aromatic hydrocarbons in edible vegetable oils in China [J]. Food Control, 2016, 62: 165–170.

[8] 胡高峰, 蔡克周, 李雨竹, 等. 食品加工过程中多环芳烃生成的影响因素及控制研究进展[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14): 196–201.
HU GF, CAI KZ, LI YZ, *et al*. Research progress on influencing factors and control of polycyclic aromatic hydrocarbons formation during food processing [J]. Food Research and Development, 2020, 41(14): 196–201.

[9] YIN JJ, JIANG XM, NIE Y, *et al*. A comprehensive review on the formation and mitigation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) in edible oils: From oilseeds to oils [J]. Current Research in Food Science, 2025, 11: 11101151.

[10] FRENKLACH M, WANG H. Detailed surface and gas-phase chemical kinetics of diamond deposition [J]. Physical Review B, 1991, 43(2): 1520–1545.

[11] SIEGMANN K, SATTLER K. Formation mechanism for polycyclic aromatic hydrocarbons in methane flames [J]. The Journal of Chemical Physics, 2000, 112(2): 698–709.

[12] SHUKLA B, KOSHI M. A highly efficient growth mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2010, 12(10): 2427–2437.

[13] ALTARAWNEH M, ALI L. Formation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in thermal systems: A comprehensive mechanistic review [J]. Energy & Fuels, 2024, 38(22): 21735–21792.

[14] XU XX, LIU XF, WANG S, *et al*. Relationship between PAH4 formation and thermal reaction products in model lipids and possible pathways of PAHs formation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 465(5): 133374.

[15] XU X, LIU X, ZHANG J, *et al*. Formation, migration, derivation, and generation mechanism of polycyclic aromatic hydrocarbons during frying [J]. Food Chemistry, 2023, 425(1): 136485.

[16] 韩园园. 浅析脂肪酸对肉类品质的影响[J]. 食品安全导刊, 2021(26): 149–151.
HAN YY. Analysis of the effects of fatty acids on meat quality [J]. Journal of Food Safety Guide, 2021(26): 149–151.

[17] 吴惠勤, 张桂英. 甲鱼油脂肪酸组成的研[J]. 分析测试学报, 1997(2): 35–37.
WU HQ, ZHANG GY. Study on fatty acid composition of soft-shelled turtle oil [J]. Journal of Instrumental Analysis, 1997(2): 35–37.

[18] 宋永康, 林虬, 苏德森, 等. 饲用鱼油脂肪酸营养成分分析[J]. 台湾海峡, 2005(3): 299–303.
SONG YK, LIN Q, SU DS, *et al*. Analysis of fatty acid nutritional components in fish oil for feed [J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2005(3): 299–303.

[19] 彭雅丽, 彭思敏, 申超群. 我国 24 种植物油脂肪酸组成比较分析与评价[J]. 农产品加工, 2023(9): 56–59, 63.
PENG YL, PENG SM, SHEN CQ. Comparative analysis and evaluation of fatty acid compositions in 24 vegetable oils in China [J]. Agricultural Products Processing, 2023(9): 56–59, 63.

[20] 关紫烽, 姜波, 白卉. 食用动物油与植物油中脂肪酸组成的比较研究[J]. 中国公共卫生, 2002(12): 35.
GUAN ZF, JIANG B, BAI H. Comparative study on fatty acid compositions in edible animal and vegetable oils [J]. Chinese Journal of Public Health, 2002(12): 35.

[21] 王澍, 周玮婧, 刘梦婷, 等. 棕榈油在面制品煎炸过程中的品质变化[J]. 食品工业, 2022, 43(2): 110–114.
WANG S, ZHOU WJ, LIU MT, *et al*. Quality changes of palm oil during frying of flour products [J]. The Food Industry, 2022, 43(2): 110–114

[22] 刘梓萱. 榛子油热加工过程中脂肪酸氧化规律及多环芳烃(PAHs)形成机制研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2023.
LIU ZX. Study on fatty acid oxidation and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) formation mechanism during thermal processing of hazelnut oil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2023.

[23] 聂文. 食品组分对烤肠中 PAHs 生成的影响及其抑制研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2019.
NIE W. Effects of food components on PAHs formation in sausages and their inhibition [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2019.

[24] 董君. 油脂对油炸猪肉丸中多元有害物形成规律的研究[D]. 天津: 天津科技大学, 2022.
DONG J. Study on the formation of multiple harmful substances in fried pork balls influenced by oils [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2022.

[25] 陈焱, 王翔宇, 孙承国, 等. 不同植物油煎炸过程中微量物质变化分析

[J]. 中国油脂, 1-12. [2024-05-28]. DOI: 10.19902/j.cnki.zgyz.1003-7969.230623
CHEN Y, WANG XY, SUN CG, *et al*. Analysis of trace substances changes in different vegetable oils during frying [J]. Chinese Oils and Fats, 1-12. [2024-05-28]. DOI: 10.19902/j.cnki. zgyz.1003-7969.230623

[26] 胡洋健. 冷等离子体处理对不同油脂添加的烤牛肉中多环芳烃减控作用研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2022.
HU YJ. Study on the reduction and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in roasted beef with different oil additions by cold plasma treatment [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2022.

[27] 石龙凯, 刘玉兰, 王莹辉, 等. 油脂煎炸过程中多环芳烃含量的变化[J]. 现代食品科技, 2015, 31(4): 311–315.
SHI LK, LIU YL, WANG YH, *et al*. Changes of polycyclic aromatic hydrocarbons content during oil frying [J]. Modern Food Science and Technology, 2015, 31(4): 311–315.

[28] 张楷淳, 董新凤. 高温煎炸对大豆油、花生油中酸价及多环芳烃含量的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2025, 16(14): 260–266.
ZHANG KC, DONG XF. Effects of high temperature frying on acid value and content of polycyclic aromatic hydrocarbons in soybean oil and peanut oil [J]. Journal of Food Safety & Quality, 2025, 16(14): 260–266.

[29] XIN L, HU M, MA X, *et al*. Selection of 12 vegetable oils influences the prevalence of polycyclic aromatic hydrocarbons, fatty acids, tocol homologs and total polar components during deep frying [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2022, 114: 104840.

[30] JI J, LIU Y, MA Y. Variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in vegetable oils during seed roasting pre-treatment [J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2020, 42(5): 2447–2460.

[31] EL-HUSSEINI M, MOURAD R, ABDUL-RAHIM H, *et al*. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) in the traditional lebanese grilled meat products and investigation of broasted frying cooking method and meat size on the PAH4 Formation [J]. Polycyclic Aromatic Compounds, 2019, 41(1): 124–142.

[32] LIU X, XU X, WU Y, *et al*. Formation and network relationship of four hazards in fried foods [J]. Food Science and Human Wellness, 2025. DOI: 10.26599/fshw.2025.9250526

[33] ZHU ZS, XU Y, HUANG TR, *et al*. The contamination, formation, determination and control of polycyclic aromatic hydrocarbons in meat products [J]. Food Control, 2022, 141: 109194.

[34] 裴雯君. 儿茶素和 *α*-生育酚对油茶籽油高温加热过程中 PAH4 生成和消长规律的影响[D]. 无锡: 江南大学, 2023.
PEI WJ. Effects of catechins and *α*-tocopherol on the formation and growth/decline of PAH4 during high-temperature heating of *Camellia* oil [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2023.

[35] ZHANG X, ZHANG L, GUO Y, *et al*. The impact of α-tocopherol on the generation of four polycyclic aromatic hydrocarbons during the thermal processing of camellia oleifera oil [J]. Journal of Food Composition and Analysis, 2025, 144: 107697.

[36] 刘聪聪. 电烤过程中抗氧化剂对脂肪及脂肪酸多环芳烃形成的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2019.
LIU CC. Effects of antioxidants on fat, fatty acids and polycyclic aromatic hydrocarbons formation during electric roasting [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2019.

[37] NIE W, CAI K, LI Y, *et al*. Study of polycyclic aromatic hydrocarbons generated from fatty acids by a model system [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2019, 99(7): 3548–3554.

[38] MEHDI M, EHSAN S, FARANAK B. Comparison of the effects of microwave cooking by two conventional cooking methods on the concentrations of polycyclic aromatic hydrocarbons and volatile N-nitrosamines in beef cocktail smokies (smoked sausages) [J]. Journal of Food Processing and Preservation, 2021, 45(6): e15560.

[39] LIU J, SHEN M, LIU X, *et al*. The loss and fate of BaA, Chr, BbF, and BaP (PAH4) tracked by stable isotope during frying [J]. Food Chemistry, 2022, 374: 131769.

[40] 白雪. 烤羊肉中多环芳烃形成及抑制研究[D]. 西安: 陕西科技大学, 2021.
BAI X. Formation and inhibition of polycyclic aromatic hydrocarbons in roasted lamb [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2021.

[41] YANG J, YONGFENG L, YOUNG QS. Systematic evaluation of nutritional and safety characteristics of Hengshan goat leg meat affected by multiple thermal processing methods [J]. Journal of Food Science, 2020, 85(4): 1344–1352.

[42] LIU G, XU X, LIU X, *et al*. Mitigation of PAH4 migration and oil fume emissions during frying: Comparative evaluation of antioxidant efficacy in soybean oil [J]. Food Chemistry, 2025, 495: 146554.

[43] ÖZ E, EKİZ E, SAVAŞ A, *et al*. Impact of roasting level on fatty acid composition, oil and polycyclic aromatic hydrocarbon contents of various dried nuts [J]. Turkish Journal of Agriculture and Forestry, 2021, 45(2): 213–221.

[44] AGUS BAP, HUSSAIN N, SELAMAT J. Quantification of PAH4 in roasted cocoa beans using QuEChERS and dispersive liquid-liquid micro-extraction (DLLME) coupled with HPLC-FLD [J]. Food Chemistry, 2020, 303: 125398.

[45] LIU R, ZHANG Y, WANG J, *et al*. Assessment of contamination source and quality control approach for polycyclic aromatic hydrocarbons in wood-pressed rapeseed oil [J]. Food Additives & Contaminants: Part A, 2018, 35(6): 1155–1163.

[46] JI J, JIANG M, ZHANG Y, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons contamination in edible oils: A review [J]. Food Reviews International, 2022, 39(9): 6977–7003.

[47] RATERS M, MATISSEK R. Quantitation of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAH4) in cocoa and chocolate samples by an HPLC-FD method [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(44): 10666–10671.

[48] TIAN H, YU J, LI M, *et al*. Effect of curcumin on the formation of polycyclic aromatic hydrocarbons in grilled chicken wings [J]. Food Chemistry, 2023, 414: 135561.

[49] 和晓梅. 香辛料对油炸肉制品危害物形成及品质的影响[D]. 天津: 天津科技大学, 2023.
HE XM. Effects of spices on the formation of harmful substances and quality of fried meat products [D]. Tianjin: Tianjin University of Science & Technology, 2023.

[50] XU X, LIU X, XU X, *et al*. Key to promoting polycyclic aromatic hydrocarbons generation in lipid thermal reactions: Free radicals originating from lipid hydroperoxides [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2025, 73(27): 17176–17189.

[51] SISKOS I, ZOTOS A, TAYLOR KA. The effect of drying, pressure and processing time on the quality of liquid-smoked trout (*Salmo gairdnerii*) fillets [J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2005, 85(12): 2054–2060.

[52] WANG Z, NG K, WARNER RD, *et al*. Application of cellulose- and chitosan-based edible coatings for quality and safety of deep-fried foods [J]. Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety, 2023, 22(2): 1418–1437.

[53] 张东东. 炒香型油脂生产中多环芳烃的控制[D]. 郑州: 河南工业大学, 2016.
ZHANG DD. Control of polycyclic aromatic hydrocarbons in the production of roasted-flavor oils [J]. Zhengzhou: Henan University of Technology, 2016.

[54] DOYEONG K, BORAM K, HANSEUNG S. Reduction of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sesame oil using cellulosic aerogel [J]. Foods, 2021, 10(3): 644.

(责任编辑: 韩晓红 蔡世佳)